

можно применить сваи-шпоны, тем самым разгрузить конструкцию за счет уменьшения расчетных длин свай и доиспользовать прочность грунта оползневой толщи, придя в итоге к более оптимальным параметрам противооползневого сооружения.

1. Гинзбург Л.К., Ищенко В.И. Определение критического расстояния между удерживающими элементами противооползневых конструкций // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1991. – №2. – С.11-12.

2. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. – М.: Стройиздат, 1979. – 80 с.

3. Снежко О.В., Кильвандер Э.Я. Об едином методе определения расчётного сопротивления грунта основания при действии как вертикального, так и горизонтального давления // II Научно-техническая конференция по механике грунтов и фундаментостроению. Т.2. – Полтава, 1995.

4. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: ГСИ, 1963. – 636 с.

5. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1985. – 41 с.

6. Завриев К.С., Шпиро Г.С. Расчёты фундаментов мостовых опор глубокого заложения. – М.: Транспорт, 1970. – 216 с.

*Получено 09.12.2005*

УДК 697.9

А.Ф.СТРОЙ, д-р техн. наук, А.В.МАКАРЕНКО

*Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка*

ЕЖИ ЗБИГНЕВ ПИОТРОВСКИ, д-р техн. наук

*Свентокишинская политехника, г.Кельце (Польша)*

## **РАСЧЕТ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЯ СКВОЗЬ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫТЯЖНЫХ КАНАЛОВ В ПОМЕЩЕНИИ**

Анализируется существующая методика определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций многоэтажных зданий в соответствии с требованиями СНиП. Обоснована неадекватность её применения при определении воздухопроницаемости ограждений для помещений с естественной вентиляцией. Предложена новая методика определения воздухопроницаемости ограждений.

Повышенная воздухопроницаемость ограждений в зимний период является негативным фактором, потому что инфильтрация вызывает дополнительные потери тепла и охлаждение помещений, а эксфильтрация может неблагоприятно отразиться на влажностном режиме наружных ограждений, способствуя конденсации в них влаги.

Анализируя процесс воздухопроницаемости, нами одновременно проанализирована методика расчета воздухопроницаемости, предлагаемая СНиП II-3-79\*\* Строительная теплотехника. Нормы проектирования. Эта методика предполагает, что в квартиры нижних этажей здания поступает воздух за счёт инфильтрации, а из квартир верхних

этажей удаляется за счёт эксфильтрации. В ходе анализа был сделан вывод, что данная методика не пригодна для учета воздухопроницаемости ограждающих конструкций жилых многоэтажных зданий с естественной вытяжной вентиляцией.

Далее, в статье будет показано, в чем же заключается ошибочность существующей методики, и предложен иной подход к решению данной задачи.

Фильтрация воздуха через ограждение происходит вследствие наличия разности давлений по обе его стороны. Существует несколько причин возникновения этой разности:

- разность плотностей наружного и внутреннего воздуха, обусловленная разностью их температур;
- действие ветра (динамическое давление ветрового потока, или разрежение с наветренной стороны);
- работа вытяжной вентиляции, которая также обусловлена разностью температур (плотностей) наружного и внутреннего воздуха.

Все эти факторы в реальности действуют совместно.

СНиП II-3-79\*\* предлагает определять разность давлений для определения фильтрации воздуха по следующей зависимости

$$\Delta P = 0,55 \cdot H \cdot (\gamma_n - \gamma_g) + 0,03 \cdot \gamma_n \cdot V^2,$$

где  $H$  – высота здания (от поверхности земли до верха карниза), м;  $0,55 \cdot H \cdot (\gamma_n - \gamma_g)$  – эта часть уравнения учитывает гравитационное давление, но недостаточно ясно, что характеризует коэффициент 0,55.

Другое слагаемое данного уравнения, которое учитывает действие ветрового давления, вообще оказывается незначительным из-за коэффициента 0,03. При этом не учитывается изменение скорости ветра по высоте.

В целом можно утверждать, что физическая модель, принятая в [1-3] для решения вопросов воздухопроницаемости малоприменима для многоэтажных зданий, так как дает не соответствующие действительности результаты.

В современных методиках никак не учитываются потери давления при движении воздуха через ограждающие конструкции.

Цель работы – дать более обоснованные рекомендации по определению воздухопроницаемости сквозь ограждающие конструкции при наличии вытяжной вентиляции в помещении, показать, что воздухопроницаемость ограждений также влияет и на работу вытяжной вентиляции.

Наилучшей физической моделью для рассмотрения данного во-

проса можно считать модель здания, состоящую из отдельных элементов, которые разделяются между собой перегородками. В первом приближении перегородки можно считать воздухонепроницаемыми (рис.1).

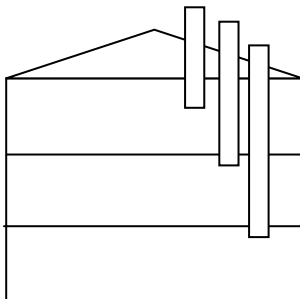


Рис.1

Для дальнейшего рассмотрения, в рамках принятой физической модели, сделаны следующие упрощения:

- поскольку температура во всех помещениях, расположенных друг над другом на разных этажах, одинакова, то считаем, что перетекание воздуха через междуэтажные перекрытия отсутствует;
- пренебрегаем воздухопроницаемостью надподвального и чердачного перекрытий;
- будем считать двери, разделяющие отдельную квартиру от лестничной клетки, воздухонепроницаемыми;
- не учитываем действие ветра;
- считаем, что внутренняя температура воздуха во всех помещениях одинакова и равна 18 °С.

Поскольку мы не учитываем действие ветрового давления, то побудителями движения воздуха будет только гравитационное давление, возникающее в результате разности веса столба воздуха с внутренней и наружной сторон ограждения. Это гравитационное давление и является потенциалом для переноса массы воздуха. При этом оно теряется при движении воздуха через ограждающие конструкции и неплотности оконных проемов и балконных дверей, а также при его движении по вытяжному каналу системы вентиляции (потери давления при движении воздушных масс через пространство квартиры не учитываем).

Однозначным (если считать процесс установившимся), является то, что в помещении установится такое давление, при котором количество удаляемого и приточного воздуха будет одинаковым.

Рассмотрим отдельно взятое помещение. Вытяжные каналы отсутствуют. В помещении, в горизонтальной плоскости посередине здания установится изобарическая поверхность, выше которой будет наблюдаться эксфильтрация воздуха из помещения, а ниже – инфильтрация в него. На линии пересечения вышеупомянутой плоскости с ограждением (далее – «нулевая плоскость»), движения воздуха сквозь ограждения не будет (рис.2).

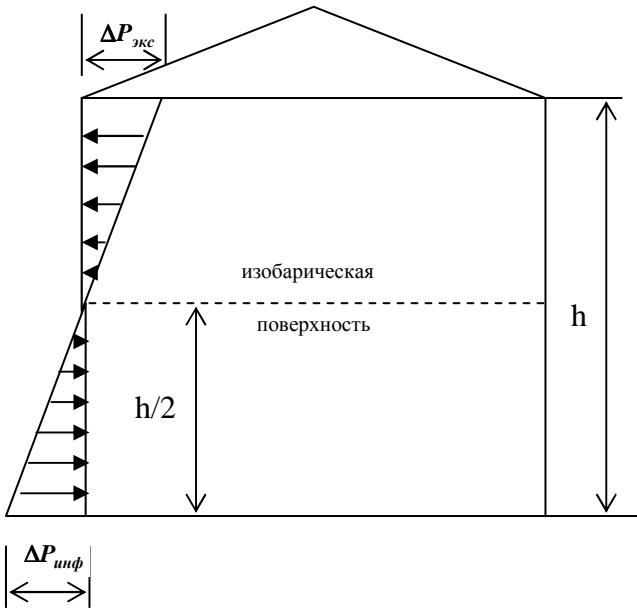


Рис.2

Следовательно, максимальная разность давления с разных сторон ограждения будет в самой верхней и нижней точках ограждения. Численно она равна

$$\Delta P_{\text{экс}} = \Delta P_{\text{инф}} = 0,5 \cdot h \cdot (\gamma_H - \gamma_B), \text{ Па}, \quad (1)$$

где  $h$  – высота рассматриваемого наружного ограждения (высота этажа);  $\gamma_H, \gamma_B$  – удельный вес соответственно наружного и внутреннего

воздуха, который определяется  $\gamma_i = \frac{3463}{273 + t_i} = \frac{353}{273 + t_i} \text{ г Н/м}^3$ .

Расчетная разность давления

$$\Delta P_{\text{экс}}^p = \Delta P_{\text{инф}}^p = 0,25 \cdot h \cdot (\gamma_H - \gamma_B).$$

Наличие естественной вентиляции создаст дополнительное давление со стороны наружного воздуха (рис.3) и дополнительный приток воздуха сквозь ограждающие конструкции в помещение.

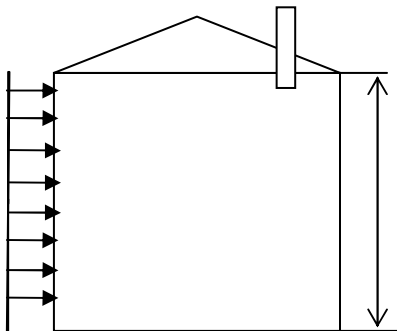


Рис.3

При совместном рассмотрении этих двух факторов и их наложении будет наблюдаться смещение нулевой плоскости в верхнюю зону помещения, поскольку удаление определенного количества воздуха из помещения через вытяжные каналы создаст в нем дополнительное разрежение и, следовательно, увеличит разность давления для инфильтрации воздуха и уменьшит ее для эксфильтрации (рис.4, а). При значительном превышении потерь давления на приток над потерями давления в вытяжном канале эта зона может вообще исчезнуть (рис.4, б).

Предположим, что нулевая плоскость расположена на уровне потолка. Эксфильтрация в этом случае отсутствует, а расчётная разность давлений на инфильтрацию равна

$$\Delta P_{\text{инф}}' = 0,5 \cdot h \cdot (\gamma_H - \gamma_B).$$

Эта расчётная разность давлений будет использоваться на приток воздуха в помещение. С другой стороны, долю гравитационного давления, используемого на приток можно определить из уравнения

$$\Delta P_{\text{пр}} = P_{\text{ср}} - \Delta P_{\text{выт}}. \quad (2)$$

В этом уравнении  $P_{\text{ср}}$  – расчётное гравитационное давление, которое можно определить следующим образом  $P_{\text{ср}} = H_i \cdot (\gamma_H - \gamma_B)$

(рис.4, а);  $\Delta P_{\text{выт}}$  – потеря давления в вытяжном канале,  $\Delta P_{\text{выт}} = S_{\text{выт}} \cdot G_{\text{выт}}^2$ ;  $S_{\text{выт}}$  – гидравлическое сопротивление вытяжного канала;  $G_{\text{выт}}$  – расход воздуха в вытяжном канале.

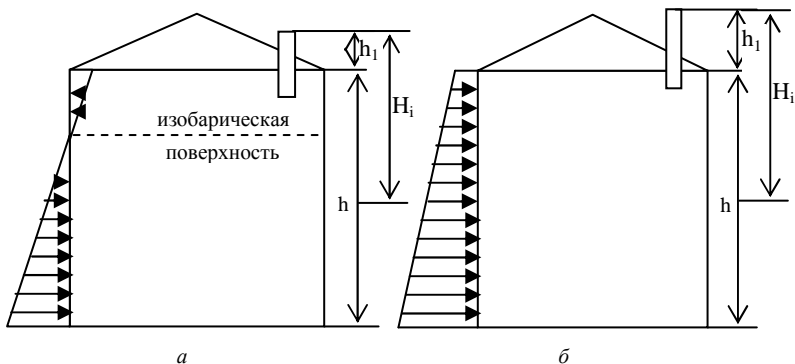


Рис.4

Если

$$\Delta P'_{\text{инф}} \leq \Delta P_{\text{пр}}, \quad (3)$$

то эксфильтрации воздуха в помещение не будет. Неравенство (3) можно представить в виде:

$$0,5 \cdot h \cdot (\gamma_H - \gamma_B) \leq H_i \cdot (\gamma_H - \gamma_B) - S_{\text{выт}} \cdot G_{\text{выт}}^2. \quad (4)$$

Здесь  $H_i = 0,5 \cdot h + h_1$ , где  $h_1$  – высота шахты от потолка, т.е. от нулевой плоскости в данном случае до выхода воздуха.

После некоторых преобразований неравенства (4) получим условие, при котором инфильтрация воздуха через наружные ограждения будет отсутствовать. Это условие имеет вид:

$$S_{\text{выт}} \cdot G_{\text{выт}}^2 \leq h_1 \cdot (\gamma_H - \gamma_B). \quad (5)$$

Левая часть неравенства (5) представляет собой потери давления в вытяжном канале. Так как сопротивление инфильтрации значительно превышает сопротивление вытяжного канала, то основные потери гравитационного давления происходят при инфильтрации воздуха в помещение. Доля потерь давления в вытяжном канале несоизмеримо меньше, чем доля потерь давления на преодоление сопротивления при инфильтрации воздуха. Поэтому неравенство (5) практически выполняется во всех случаях, т.е. когда в помещении предусмотрены окна с повышенным уплотнением или неуплотнённые окна. Это утверждение

проиллюстрируем на примере.

*Предлагаемый порядок расчета фильтрации воздуха  
через ограждающие конструкции*

Необходимо выполнить расчет воздухопроницания для однокомнатной и трехкомнатной квартиры на первом и последнем этаже пятиэтажного здания. Удаление воздуха из каждой квартиры организовано через два канала – канал кухни и санузла. Фрагмент плана здания и разрез его приведен на рис.5. Высота этажа  $h=2,8$  м. Окна неуплотненные со спаренными переплетами. Превышения конька вытяжной шахты над бесчердачным перекрытием 1 м.

Расчёт воздухопроницания для однокомнатной квартиры на первом этаже

1) Определяем располагаемое гравитационное давление (при  $t_H = +5^\circ\text{C}$ ):

$$\Delta P_{ep} = H_1(\gamma_H - \gamma_B) = (2,8 \cdot 4 + 2,5) \left( \frac{3463}{273 + 5} - \frac{3463}{273 + 18} \right) = 7,624 \text{ Па.}$$

2) Определяем гидравлические характеристики балконных дверей, окон и наружных стен.

Для окон и балконных дверей

$$S_{ок} = \frac{1}{(f_{ок} \cdot J)^2} = \frac{1}{[(1,46 \cdot 1,47 \cdot 2 + 2,175 \cdot 0,87) \cdot 2,75]^2} = 3,457 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Па} \cdot \text{ч}^2}{\text{кг}^2},$$

где  $f_{ок}$  – площадь окна «в свету»;  $J$  – воздухопроницаемость неуплотненных окон и балконных дверей, принимают равной  $2,75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}^{0,5})$  для одинарных и спаренных окон [2].

Для стен

$$S_{cm} = \frac{R_{cm}^2}{\Delta P \cdot F_{cm}^2}.$$

Здесь  $R_{cm}$  – сопротивление воздухопроницанию конструкции стены,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$  (см. [1], Приложение 9).

Для кирпичной кладки из сплошного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной в один кирпич и более  $R_{cm} = 18 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$ .

$F_{cm}$  – площадь наружных стен;  $\Delta P$  – разность давлений с наружной и внутренней сторон ограждения, за счет которой происходит инфильтрация воздуха.





Расход воздуха  $G_{np}$ , который пройдет через ограждения (окна, балконную дверь и наружную стену) под действием разности давления  $\Delta P_{np}$ :

$$G_{np} = \left( \frac{1}{\sqrt{S_{ок}}} + \frac{1}{\sqrt{S_{ст}}} \right) \sqrt{\Delta P_{np}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{np}}{S_{ок}}} + \frac{\Delta P_{np}}{R_{ст}} F_{ст}.$$

Для определения гидравлической характеристики вытяжных каналов в кухне и санузле предположим, что с помощью вытяжного канала в кухне удаляется 90 м<sup>3</sup>/ч, в санузле – 50 м<sup>3</sup>/ч.

На кухне предусмотрен канал 14×27см и вытяжная решетка твистопласт ASGC014 с габаритными размерами 400×150 и живым сечением 0,0386 м<sup>2</sup>,  $\sum \zeta = 0,2$ .

Скорость воздуха в сечении канала:

$$v = \frac{V}{3600 \cdot a \cdot b} = \frac{90}{3600 \cdot 0,14 \cdot 0,27} = 0,661 \text{ м/с.}$$

$$\text{Эквивалентный диаметр канала } d_{э\kappa\theta} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = 0,184, \text{ м.}$$

По эквивалентному диаметру и скорости движения воздуха определяем удельные потери давления (по таблицам для гидравлического расчета) в воздуховоде

$$R = 0,041 \text{ Па/м.}$$

По коэффициенту эквивалентной шероховатости (для кирпича  $K\epsilon = 4$ ) и скорости движения в канале определяем поправочный коэффициент  $n=1,93$ , который учитывает материал канала.

Потери давления по длине канала ( $l = 2,8 \cdot 4 + 1,5 = 12,7$  м)

$$\Delta P_l = R \cdot l \cdot n = 0,041 \cdot 12,7 \cdot 1,93 = 1,004 \text{ Па.}$$

Потери давления на решетке

$$Z = \frac{v^2}{2} g \cdot \sum \zeta = \frac{\left( \frac{90}{3600 \cdot 0,0386} \right)^2}{2} \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 0,412 \text{ Па.}$$

Общие потери давления (в вытяжном канале на кухне при расходе воздуха 90 м<sup>3</sup>/ч) составят:

$$\Delta P = \Delta P_l + Z = 1,004 + 0,412 = 1,416 \text{ Па.}$$

Гидравлическая характеристика канала

$$S = \frac{\Delta P}{G^2} = \frac{1,416}{90 \cdot \frac{353}{273 + 18}} = 1,188 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{ч}^2 / \text{кг}^2.$$

В санузле предусмотрен канал с размерами  $a \times b = 14 \times 14$  см.

Скорость воздуха в сечение канала

$$v = \frac{V}{3600 \cdot a \cdot b} = \frac{50}{3600 \cdot 0,14 \cdot 0,14} = 0,709 \text{ м/с.}$$

$$\text{Эквивалентный диаметр канала } d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = 0,14 \text{ м.}$$

Удельные потери давления в воздуховоде  $R = 0,075$  Па/м.

Определяем поправочный коэффициент, который учитывает материал канала  $n = 1,93$ .

Вытяжная решетка ASGC013 имеет габаритные размеры  $300 \times 150$  и живое сечение  $0,0291 \text{ м}^2$ .  $\sum \zeta = 0,2$ .

Потери давления на решетке

$$Z = \frac{\left( \frac{50}{3600 \cdot 0,0291} \right)^2}{2} \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 0,223 \text{ Па.}$$

Общие потери давления в вытяжном канале, расположенном в санузле, при расходе воздуха  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  составляют:

$$\Delta P = \Delta P_l + Z = 0,075 \cdot 12,7 \cdot 1,93 + 0,223 = 2,062 \text{ Па.}$$

Гидравлическая характеристика канала

$$S = \frac{\Delta P}{G^2} = \frac{2,062}{50 \cdot \frac{353}{273 + 18}} = 5,605 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{ч}^2 / \text{кг}^2.$$

Определим общую характеристику двух каналов при параллельной их работе. С этой целью найдем суммарную проводимость двух каналов

$$a_{\Sigma} = a_1 + a_2.$$

Проводимость и характеристика канала связаны соотношением

$$a_i = \frac{1}{\sqrt{S_i}}.$$

Общая характеристика двух каналов

$$S_{\Sigma} = \frac{1}{a_{\Sigma}^2} = \frac{1}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{2}{\sqrt{S_1 \cdot S_2}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{1,188 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{5,605 \cdot 10^{-4}} + \frac{2}{\sqrt{1,188 \cdot 10^{-4} \cdot 5,605 \cdot 10^{-4}}}} = 5,571 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{ч}^2/\text{кг}^2.$$

Предположим, что количество поступающего воздуха за счёт инфильтрации равно  $G_{np} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Определим потери давления при удалении воздуха, т.е. в двух параллельно работающих каналах при общем расходе через них  $90+50=140 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

$$\Delta P_{\text{выт}} = S_{\Sigma} \cdot G_{y\partial}^2 = 5,571 \cdot 10^{-5} \left( (90 + 50) \frac{353}{273 + 18} \right)^2 = 1,607 \text{ Па}.$$

Определим, какая часть от общего гравитационного давления осталась на приток:

$$\Delta P_{np} = \Delta P_{zp} - \Delta P_{\Sigma} = 7,624 - 1,607 = 6,017 \text{ Па}.$$

Определим, какое количество воздуха будет проникать через наружные ограждения под действием такого перепада давления.

$$G_{np} = \sqrt{\frac{\Delta P_{np}}{S_{ок}}} + \frac{\Delta P_{np}}{R_{cm}} F_{cm} = \sqrt{\frac{6,017}{3,457 \cdot 10^{-3}}} + \frac{6,017}{18} 27,619 = 50,951 \text{ кг/ч}.$$

Следовательно  $G_{np} \neq G_{y\partial}$ . Задаемся новым значением

$G_{np} = 57,3 \text{ м}^3/\text{ч}$  и определяем потери давления в вытяжных каналах при удалении такого расхода воздуха, долю давления на приток и расход воздуха, поступающего в квартиру за счёт инфильтрации. В конечном итоге расход воздуха, поступающего в квартиру за счёт инфильтрации, равен

$$G_{np} = \sqrt{\frac{\Delta P_{np}}{S_{ок}}} + \frac{\Delta P_{np}}{R_{cm}} F_{cm} = 57,811 \text{ кг/ч}.$$

Аналогичный расчёт выполнен для такой же квартиры, расположенной на пятом этаже здания, и трехкомнатной квартиры на первом и пятом этажах. Далее продублированы расчеты при разных температурах наружного воздуха. Результаты расчётов представлены в таблице.



Анализируя результаты расчетов, можно заметить, что ни в одном из случаев не будет наблюдаться эксфильтрация, т.е. во всех случаях выполняется неравенство (4). Например, для однокомнатной квартиры на первом этаже независимо от того, на каком этаже расположено помещение, при  $t_H = +5^{\circ}\text{C}$  имеем:

$$S_{\text{выт}} \cdot G_{\text{выт}}^2 = 5,571 \cdot 10^{-5} \cdot 57,3^2 = 0,184 \text{ Па};$$
$$h_1 \cdot (\gamma_B - \gamma_H) = 12,4 \cdot (12,457 - 11,9) = 6,907 \text{ Па}.$$

$$\text{Следовательно } S_{\text{выт}} \cdot G_{\text{выт}}^2 < h_1 \cdot (\gamma_B - \gamma_H).$$

Таким образом, другой подход к решению задачи воздухопроницаемости ограждающих конструкций привел нас к выводу о том, что процесс эксфильтрации воздуха в жилых помещениях будет отсутствовать независимо от того, на каком этаже расположено помещение.

Этот вывод позволяет утверждать, что уравнения приведенные в СНиП [1] неадекватно описывают процессы воздухопроницания по отношению к реальным процессам. Решение этой задачи достаточно актуально, поскольку, воздухопроницаемость ограждений неразрывно связана с работой естественной вентиляции. Кроме того, актуальность этой задачи усиливается и тем, что в наши дни все большего распространения набирают светопрозрачные ограждения на основе стеклопакетов, воздухопроницаемость которых очень незначительна, а это отрицательно сказывается на воздушном режиме помещений. Конечно, с теплотехнической точки зрения, уменьшение воздухопроницаемости ограждающих конструкций оправдано, но в таком случае необходимо предусматривать системы организованного (регулируемого) притока воздуха, так как только за счёт воздухопроницаемости нельзя обеспечить в течение большей части отопительного периода нормативный воздухообмен в квартире.

1. СНиП II-3-79\*\*. Строительная теплотехника. Нормы проектирования. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 30 с.

2. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. II. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стройиздат, 1977. – 512 с.

3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высш. шк., 1985. – 416 с.

*Получено 19.12.2005*